

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 — 1973

УДК 621.3.032.266

Д. Г. АФОНИН, Ю. А. ПИРОГОВ, Н. Ф. ЧЕЗГАНОВ

ДЕТЕКТОРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА В ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ КОНЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Методом отдельной регистрации токов в цепях радиально секционированного анода исследуются детекторные характеристики электронных пучков конечного сечения в режиме ограничения тока пространственным зарядом. Экспериментами показано, что в различных коаксиальных трубках тока пучка могут одновременно наблюдаться детекторные токи разной величины и противоположного знака. Для тонкой осевой трубки тока установлено хорошее соответствие экспериментальных данных с результатами одномерной кинематической теории.

Для описания детектирующих свойств виртуального катода (ВК) обычно применяется одномерная плоскоэлектродная модель диодного промежутка [1—3], которая для детекторного тока ΔI_a дает знакопеременную зависимость с нулем в точке $\eta^0 = 0,5 (I_a/I_0 = 0,61)$ и максимумом положительных значений при $\eta^+ = 1,5 (I_a/I_0 = 0,22)$:

$$\Delta I_a = I_0 \gamma (\eta - 0,5), \quad (1)$$

где $\eta = e_0 V_m / kT$ — модуль безразмерного потенциала ВК, e_0 — абсолютный заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — температура пучка, $I_a = I_0 \exp(-\eta)$ — анодный ток, I_0 — ток, входящий в промежуток (ток насыщения), γ — коэффициент, пропорциональный мощности СВЧ-сигнала. Поскольку реальные пучки ограничены по сечению и не могут считаться одномерными, формула (1) лишь качественно описывает реальные промежутки, в которых потенциал ВК не может оставаться постоянным по сечению пучка, повышаясь от оси к периферии. Если считать, что детекторный ток и потенциал ВК связаны однозначной зависимостью (1), то в осевых и периферийных трубках тока должны наблюдаться различные по величине и в ряде режимов различные по знаку детекторные токи. На этом основании (а также в предположении об аддитивном действии отдельных трубок тока) в теоретической работе [4] было дано объяснение тому известному из экспериментов [5, 6] факту, что точка перехода детекторного тока через нуль в случае реальных промежутков находится ближе к отсечке анодного тока, чем это дается одномерной формулой (1), т. е. при $I_a/I_0 < 0,61$.

Однако прямых экспериментальных подтверждений отмеченные явления в пучках конечного сечения пока не получали, так как требовали постановки специальных измерений: они могли быть обнаружены лишь

в приборах с секционированным анодом методом отдельной регистрации тока в отдельных слоях электронного пучка. Поэтому в настоящей работе и было предпринято экспериментальное исследование радиальных зависимостей детекторного тока.

Условия эксперимента

Исследование велось на специально изготовленных макетах, у которых выходной анодно-сеточный промежуток, схематически изображенный на рис. 1, имел коллектор, состоявший из трех изолированных один от другого электродов (1, 2 и 3), поддерживаемых под одинаковым потенциалом. Электронный пучок кругового сечения вводился в изучаемый промежуток через затянутое сеткой 4 отверстие диаметром 9 мм во входной диафрагме 5 с наружным диаметром 30 мм, достаточно большим, чтобы исключить краевые эффекты при ширине зазора 3 мм. Электроды 2 и 3 (ϕ 1 мм), электрически изолированные от анода (ϕ 30 мм), позволяли измерять плотность тока в центральной и периферийной частях пучка. Не показанная на рис. 1 электронная пушка задавала входящий в промежуток ток, плотность которого могла варьироваться от нуля до 25 ма/см^2 . Высокочастотный сигнал дециметрового

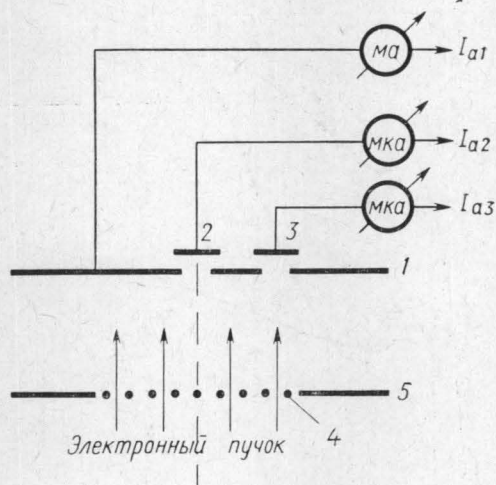


Рис. 1. Схема изучаемого анодно-сеточного промежутка

диапазона подавался в промежуток между сеткой и анодом, где создавался режим ограничения тока пространственным зарядом. Чтобы исключить возможность нелинейного детектирования, мощность сигнала выбиралась достаточно малой ($\sim 100 \text{ мквт}$) и в процессе измерений поддерживалась постоянной. Наконец, чтобы исключить влияние детектирующего действия первого, прикатодного виртуального катода на детекторные характеристики анодного промежутка, пушка была заэкранирована от ВЧ-поля сплошным замкнутым металлическим экраном с небольшими отверстиями для ввода проводов питания и сетчатым отверстием 4 для вывода электронного пучка.

Вольтамперные характеристики

Результаты измерений представлены графиками рис. 2 и 3, где изображены вольтамперные $I_a(V_a)$ и детекторные $\Delta I_a(V_a)$ характеристики электродов 1, 2 и 3 (V_a — напряжение на аноде). При изготовлении ламп нам не удалось полностью освободиться от ряда побочных явлений, таких, как вторичная эмиссия с анода, некоторая расходимость пучка, проницаемость сеток для анодного напряжения и т. п. Поэтому приведенные вольтамперные характеристики отличаются от кривых, полученных на основе закона $3/2$ Чайльда — Лангмюра, и имеют особенности, обусловленные отмеченными явлениями. На всех вольтамперных

характеристиках можно выделить несколько основных областей с преобладающим влиянием того или иного эффекта: *OA* — ограничение тока пространственным зарядом электронов, входящих в промежуток, *AB* — ограничение анодного тока за счет электронов вторичной эмиссии, *BB* — увеличение тока с ростом напряжения, обусловленное проницаемостью входной сетки. Рассматривая вольтамперные характеристики, отметим несколько важных для дальнейшего анализа особенностей.

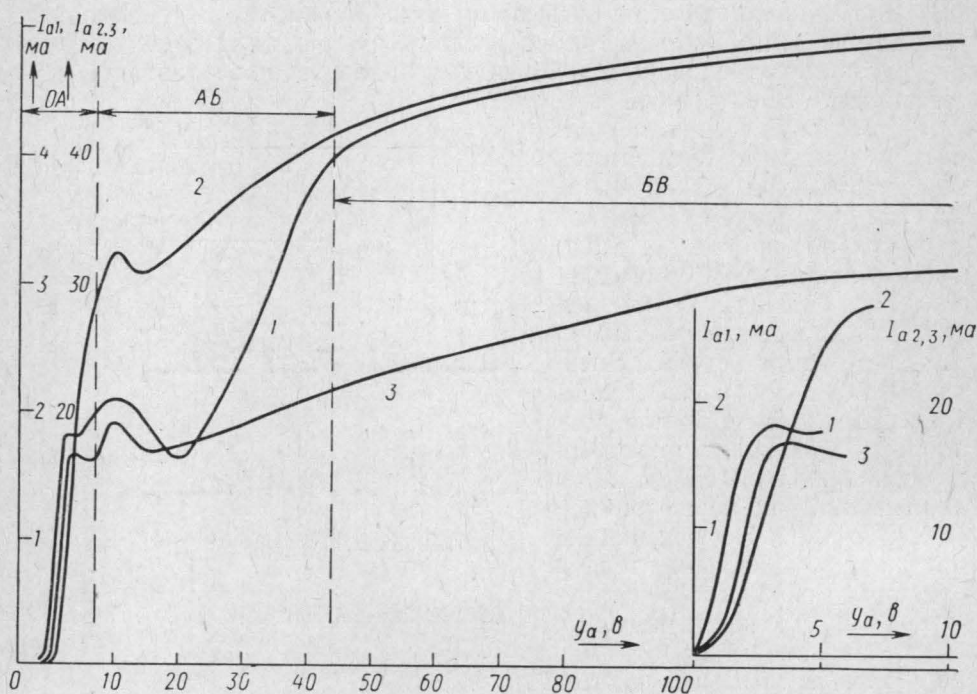


Рис. 2. Вольтамперные характеристики (номер кривой соответствует номеру анодной секции)

В центральной трубке тока (кривая 2 рис. 2 и 3) ограничение тока пространственным зарядом сильнее, чем на периферии (продольное провисание потенциала глубже на оси).

Вольтамперные характеристики периферийных областей пучка идут круче, чем на оси, так как ВК раньше срывается на периферии при повышении V_a .

Влияние вторичной эмиссии становится заметным, начиная с анодных напряжений $U_a \sim 10$ в (на всех электродах относительный максимум анодного тока располагается в одной точке $U_a \cong 10$ в); исчезает динаatronный провал на характеристике при напряжениях порядка входного $U_a = U_{вх} = 30$ в.

Анализ детекторных характеристик и сравнение эксперимента с теорией

Обратимся к рис. 3 и сравним (по потенциалу ВК) положение узловых точек (нуля и экстремумов) детекторных кривых на вольтамперных характеристиках различных секций анода. Для этого необхо-

димо знать токи, входящие в промежуток в режиме ВК, чтобы по отношению анодного тока в узловой точке ко входящему току определять потенциалы ВК в данной точке характеристики. Хотя, как отмечалось, в режиме полного токопрохождения плотность входящего тока изменяется, ясно, что при малых напряжениях на аноде ($y_a < 10$ в) в режиме существования ВК и при отсутствии вторичной эмиссии анод

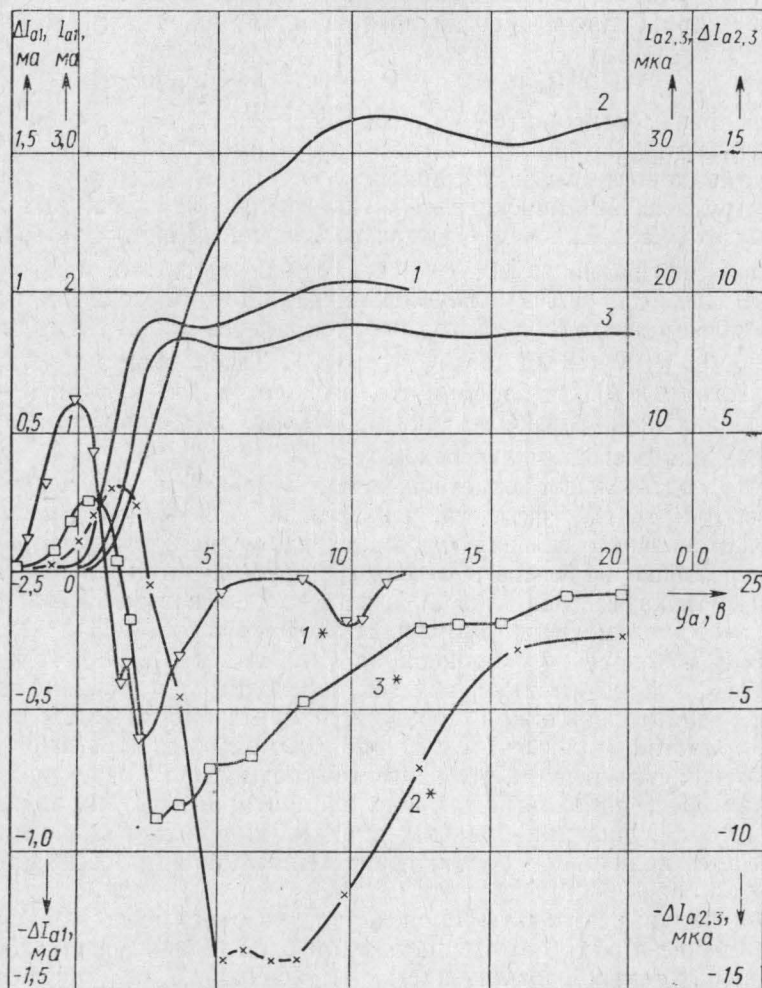


Рис. 3. Детекторные (1^* , 2^* и 3^*) и вольтамперные (1, 2 и 3) характеристики

экранируется от сеток облаком пространственного заряда и входной ток остается постоянным. Кроме того, из графиков рис. 2 видно, что в области БВ токи на все анодные секции изменяются по одинаковому закону и, как показано в [8], являются пропорциональными току, входящему в промежуток при существовании в нем виртуального катода. Таким образом, для области БВ можно записать:

$$I_{\text{ан}}^{\text{БВ}} = k(y_a) \cdot I_{\text{оп}}, \quad (2)$$

где $n=1, 2, 3$ — номер анодной секции, $I_{\text{ан}}^{\text{БВ}}$ — анодный ток в цепи

n -ой секции (на участке $BВ$ характеристики); $I_{он}$ — ток, входящий в анодно-сеточный промежуток через сечение трубки тока, вырезаемой n -й анодной секцией, при наличии в промежутке ВК (участок $ОА$ характеристик), $k(y_a)$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от анодного напряжения, но одинаковый для всех кривых.

Обозначим через $I_{ан}$ анодный ток на участке $ОА$ и через $I_{ан}^0$ анодный ток на участке $BВ$ при некотором, одинаковом для всех кривых анодном напряжении $y_{а0}$. Тогда логарифм отношения этих токов будет

$$\ln(I_{ан}/I_{ан}^0) = \ln(I_{ан}/I_{он}) - \ln k(y_{а0}) \quad (3)$$

давать безразмерный потенциал ВК ($\eta = -\ln(I_{ан}/I_{он})$), определенный с точностью до постоянного слагаемого ($-\ln k(y_{а0})$), в первом приближении одинакового для всех кривых.

Для уменьшения ошибки выберем в качестве нормировочных значения анодного тока на начальных участках регулярной области $BВ$ вольтамперных характеристик, например, $I_{а1}^0 = 4,4$ ма, $I_{а2}^0 = 43$ мка и $I_{а3}^0 = 24$ мка при $y_{а0} = 60$ в (см. рис. 2). Нормированные по этим величинам анодные токи в точке перехода детекторного тока через нуль имеют значения: $I_{а1}/I_{а1}^0 = 0,18$; $I_{а2}/I_{а2}^0 = 0,21$ и $I_{а3}/I_{а3}^0 = 0,21$. Таким образом, в элементарных трубках (2 и 3) детекторный ток проходит через нуль при одинаковых значениях нормированного тока и больших, чем соответствующее значение тока для всего пучка в целом ($I_{а2}/I_{а2}^0 = I_{а3}/I_{а3}^0 > I_{а1}/I_{а1}^0$). Это непосредственно подтверждает отмеченные во введении теоретические предпосылки работы [4], где считалось, что если во всех элементарных трубках тока пучка конечного сечения «работает» одномерная формула (1), то за счет суперпозиции эффектов в отдельных трубках интегральная детекторная кривая (кривая I^* на рис. 3) сдвигается по вольтамперной характеристике в область меньших суммарных анодных токов.

С учетом поперечного провисания потенциала ВК становится понятным и тот факт, что детекторный ток переходит от положительных значений к отрицательным при меньших анодных напряжениях в периферийных областях (кривые I^* и I^3 рис. 3), чем в центральной трубке тока. Объясняется это тем, что соответствующий нулю детекторного тока потенциал ВК (одинаковый для всех элементарных трубок тока) реализуется на оси пучка при больших анодных напряжениях, чем на периферии, где с увеличением y_a пространственный заряд рассеивается быстрее, чем на оси.

Анализируя результаты проведенного эксперимента, можно найти подтверждение и ряду других положений одномерной теории детектирования, выражаемых соотношением (1). Очевидно, что наиболее точно формула (1) должна описывать процессы в центральной трубке тока, где лучше, чем в краевых областях пучка, выполняются условия плоскоэлектродной модели (последнее отмечалось также в [7] при исследовании электроники трубок дрейфа в продольном магнитном поле). В самом деле, если предположить, что в соответствии с (1) в элементарных трубках безразмерный потенциал ВК в нуле детекторного тока равен 0,5 ($I_{а1,2}/I_{о1,2} = e^{-0,5}$), то можно вычислить из данных эксперимента считавшуюся ранее неопределенной аддитивную логарифмическую постоянную. Из (3) имеем

$$\ln k(y_{а0}) = -\ln(I_{а1,2}/I_{о1,2}^0) + \ln(I_{а1,2}/I_{о1,2}) = 1,08. \quad (4)$$

Тогда определяется и действительное положение на вольтамперной характеристике одного из экстремумов детекторного тока — максимума

положительных приращений (в случае отрицательного детекторного тока существенно труднее сравнивать теорию с экспериментом, так как фундаментальный эффект — сортировка по скоростям первичного потока электронов — вуалируется в этой области вольтамперной характеристики значительным влиянием пока что слабо изученных явлений детектирования в присутствии вторичной эмиссии с коллектора). Поскольку максимум положительных детекторных токов наблюдается в центральной трубке при нормированном токе $I_{a2}^+/I_{a2}^0 = 0,07$ (см. рис. 3), безразмерный потенциал ВК в этой точке в соответствии с (3) и (4) равен $\eta^+ = -\ln(I_{a2}^+/I_{a2}^0) = -\ln(I_{a2}^+/I_{a2}^0) - \ln k(y_{a0}) = 1,6$, что соответствует отношению анодного тока к входящему току в максимуме положительных приращений $I_{a2}^+/I_{a2}^0 = 0,2$. Этот результат практически совпадает со значением $I_a^+/I_0 = 0,22$, полученным в [3] при исследовании на экстремум выражения (1).

Заканчивая обсуждение проведенного эксперимента, особенно интересно отметить, что в некоторой области анодных напряжений возле точки перехода интегральной детекторной кривой (I^* на рис. 3) через максимум отрицательных приращений ($y_a = 2$ в) центральная и периферийная трубки тока, как и предсказывалось в [4], работают «вразнобой»: в пучке одновременно наблюдаются и положительные и отрицательные изменения анодного тока, взаимно компенсирующие друг друга. Это приводит к уменьшению чувствительности СВЧ-детектирования в приборах с ограниченными по сечению электронными пучками — обстоятельство, которое необходимо учитывать при разработке СВЧ-детекторов с виртуальным катодом.

В заключение авторы выражают благодарность Р. В. Лебедеву за интерес к работе и полезные обсуждения полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гвоздовер С. Д. «Изв. вузов», радиофизика, 8, 2, 308—318, 1965.
2. Мякишев Г. А. «Радиотехника и электроника», 12, вып. 8, 1405—1414, 1967.
3. Пирогов Ю. А. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 12, № 6, 33—39, 1971.
4. Пирогов Ю. А. «Изв. вузов», радиотехника, (в печати).
5. Костиенко А. И., Девятков М. Н., Пирогов Ю. А. «Электронная техника», электроника СВЧ, вып. 2, 146—150, 1967.
6. Девятков М. Н., Костиенко А. И., Пирогов Ю. А., Романюк С. К. «Электронная техника», электроника СВЧ, вып. 9, 86—90, 1970.
7. Девятков М. Н., Овчинникова Г. И., Якименко В. Д. «Электронная техника», электроника СВЧ, № 9, 16—23, 1972.
8. Rothe H., Kleen W. Grundlagen und Kennlinien der Elektronenrohren. Leipzig, 1951.

Поступила в редакцию
30.11 1971 г.

Кафедра
радиотехники